

社会属性感知的间断连接无线网络数据转发策略

吴大鹏, 孔晓龙, 张洪沛, 刘乔寿, 熊余, 王汝言

(重庆邮电大学 宽带泛在接入技术研究所, 重庆 400065)

摘要: 间断连接无线网络中的节点具有极强的聚集特性, 数据转发过程需要充分地考虑节点之间的社会关系。提出一种社会属性感知的数据分发策略, 根据实时获取的多维网络状态参数, 节点以分布式的方式估计其自身及其他节点的社会属性。进而确定数据携带节点与目的节点之间的关系, 以最小化资源开销的方式实现数据转发。结果表明, 与典型机制相比, 所提出的数据转发策略具有较高的投递率和较低的延迟, 有效地改善了网络性能。

关键词: 间断连接无线网络; 数据转发; 社会属性; 节点关系

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Social attributes aware data forwarding strategy in intermittently connected wireless networks

WU Da-peng, KONG Xiao-long, ZHANG Hong-pei, LIU Qiao-shou, XIONG Yu, WANG Ru-yan

(Broadband Ubiquitous Network Research Laboratory, Chongqing University of Posts and Telecom., Chongqing 400065, China)

Abstract: The nodes in the intermittent connection wireless network have the aggregation feature, the relation between nodes should be considered by the packet transmitting procedure. A social attributes aware data forwarding strategy in ICWN is proposed. According to the multiple parameters of network status, the social attribute of nodes is evaluated with the distribute manner; moreover, the relation between nodes is determined. Consequently, the packets are forwarded to their destination nodes. Results show that the packet delivery ratio and the delay can be optimized by proposed strategy.

Key words: intermittent connection wireless network; data forwarding; social attributes; node relation

1 引言

近年来, 移动自组织网络 (MANET, mobile Ad-Hoc network) 成为无线通信网络领域的研究热点。但 MANET 中的数据转发过程存在较为严格的假设, 即源节点和目的节点之间存在可靠的端到端路径。然而, 受拓扑动态变化、节点密度、节点缓存及信号衰减等各种因素的影响, 源节点和目的节点之间的通信路径将频繁断裂, 严重地影响了网络的业务承载能力。针对传输路径在时间域和空间域的非连续特性, 研究人员提出了间断连接无线网络 (ICWN, intermittently connected wireless network)

体系架构, 节点充分利用运动过程中所产生的临时链路, 以更加灵活的“存储—携带—转发”方式实现节点间通信^[1-3]。显然, 对于动态性极强的 ICWN 来说, 数据转发策略将直接影响其业务服务质量。

但是, ICWN 中的数据转发策略受到多个方面因素的影响。首先, 节点间的链路具有间断连接特性, 网络拓扑动态性较强, 使源、目的节点的连接状态难以估计。此外, 实际测量表明, ICWN 具有“大世界, 小世界”特性^[4]。根据彼此之间的社会关系, 网络中的节点呈现出聚集特性, 各个节点以自组织的方式形成社区, 社区内部节点间联系相对紧密, 而社区间联系则相对稀疏, 数据转发策略应

收稿日期: 2013-08-12; 修回日期: 2013-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61371097); 重庆市自然科学基金重点基金资助项目(CSTC2013JJB40001, CSTC2013JJB40006); 重庆市青年科技人才培养计划基金资助项目(CSTC2014KJRC-QNRC40001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61371097); The Natural Science Foundation of Chongqing (CSTC2013JJB40001, CSTC2013JJB40006); Youth Talents Training Project of Chongqing Science & Technology Commission (CSTC2014KJRC-QNRC40001)

充分考虑节点间社会属性的差异。

针对上述问题，国内外研究人员提出了多种数据转发策略^[5-8]，节点以泛洪的方式利用相遇之后所建立的临时链路转发数据，但是，这些策略并未考虑节点的社会属性，无法适用于实际应用场景。文献[9]提出一种面向社区结构的数据转发策略，源节点向其归属社区内的所有节点泛洪数据副本，成功接收数据副本的节点到达目标社区之后继续执行泛洪操作，直到数据投递成功。虽然该方法在一定程度上降低了数据转发开销，但在社区规模较大或网络负载较大时性能较差。文献[10]定义了节点向心度和相似度参数，并设计了相关方法以动态地发现连通各个社区的中继节点，进而完成数据转发。但所提出的机制并未对节点归属社区状态进行区分，数据副本将以一定的概率进入非目标社区，导致冗余数据消耗较多的网络资源。文献[11]提出了带有节点社会关系差异程度感知的分布式数据转发策略，利用重要程度较高的节点来转发数据，进而提高数据转发的效率。

然而，根据社会网络理论可知节点之间的社会关系包括垂直社会关系和水平社会关系 2 个维度，水平社会关系是指活动规律相似的节点所形成的关系；垂直社会关系是指社会特征不同的节点所形成的关系。文献[9-11]虽然考虑了节点之间的垂直社会关系，即不同社会地位节点间的数据转发，但忽略了节点之间的水平社会关系，即同等社会地位节点间的数据转发。此外，各种机制均需要在网络中泛洪一定数量的数据副本，导致有限的网络资源并未得到充分利用，扩展性受到较大限制。

充分考虑 ICWN 中节点的社会属性及节点间的垂直社会关系和水平社会关系，本文提出一种社会属性感知的数据转发策略（SADFS, social attributes aware data forwarding strategy），通过感知节点中心度、活跃度及相遇间隔时间等多维网络状态参数，以分布式的方式感知节点的社会属性，进而估计节点之间的水平及垂直关系，以合理地选择中继节点完成数据转发。

2 社会属性感知方法

如前所述，ICWN 中的节点具有极强的社会属性，且各个节点的社会关系呈现出动态特性，因此，节点社会属性的感知结果需要根据其运动过程实时获取；同时，ICWN 资源有限，难以采用泛洪的

方式将各个节点的社会属性告知其他节点，社会属性感知方法需要以分布式方式运行。

针对节点的垂直关系和水平关系，设计了节点社会属性感知方法，主要包括节点重要程度感知和节点邻居判定，相关参数定义如表 1 所示。

表 1 参数定义

参数名称	参数含义
n	网络中的节点数量
N	网络中的社区数量
c_x	网络中 x 社区的编号
$n(c_x)$	社区 x 中的节点数量
$n(i)$	给定时间内节点 i 与本社区内所遇节点的数量
$w(i)$	节点 i 的重要程度
$w(i, m)$	节点 i 对数据 m 的重要程度
$n(i, j)$	节点 i, j 相遇的总次数

2.1 节点重要程度感知

大量研究表明，ICWN 具有无标度特性^[12, 13]，部分节点对网络资源有更高的控制能力，且其余节点对其依赖程度更高，此类节点称为重要程度较高的节点。ICWN 中节点的重要程度主要表现为 2 个方面，分别为节点中心度和节点活跃程度，其中，重要程度较高的节点与网络中多个节点的关系较为紧密，即节点中心度较高；此外，此类节点在给定时间内与其他节点相遇次数较多，即节点活跃程度较高，可见，感知各个节点的重要程度并选择重要程度较高的节点转发数据将有效地提高网络资源利用率。显然，对于具有间断连接及分布式运行特征的 ICWN 来说，无法采用基于节点连通度的重要程度衡量方法。因此，本文综合考虑节点中心度与活跃度 2 个方面因素量化其重要程度。

1) 节点中心度

如前所述，中心度高的节点在给定时间内将与多个节点相遇，采用该参数可以量化节点中心程度。然而，网络中的各个社区规模呈现出较大的差异性，归属社区相同的节点相遇概率较高，单纯地以相遇节点数量作为中心度衡量标准将导致估计结果存在偏差，即规模较大社区的节点中心程度普遍高于规模较小社区的节点。因此，本文将节点中心度定义为给定时间内的相遇节点数量与本社区内节点数量的比例，如式(1)所示，其中， $\delta(i, j)$ 表示网络持续运行过程中节点 i, j 是否相遇，如式(2)所示。

$$d_i = \frac{\sum_{j=1}^{n(i)} \delta(i,j)}{n(c_x)} \quad (1)$$

$$\delta(i,j) = \begin{cases} 1, & i,j \text{ 曾经相遇}, i \neq j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

2) 节点活跃度

ICWN 中重要程度较高的节点具有较强的活跃性。因此，节点活跃度可表示为给定节点与其余节点连接建立的快慢程度，如式(3)所示。

$$Q(i,T) = \frac{|N_i(T) - (N_i(T) \cap N_i(T-1))|}{|N_i(T)|} \quad (3)$$

其中， $N_i(T)$ 表示 T 时间段内与节点 i 建立连接的节点集合， $Q(i,T)$ 值越大表示连接重建的速度越快，也意味着该节点与其余节点相遇越频繁。

按照上述定义，节点中心度反映了其在网络中与其他节点的关系广度，节点活跃程度描述了其在网络中与其他节点的关系强度。本文综合考虑中心度和活跃度量化节点重要程度，如式(4)所示，其中， α 为权重因子。

$$w(i) = (1 - \alpha)d_i + \alpha Q(i,T) \quad (4)$$

显然，权重因子的确定对节点重要程度感知结果的准确程度至关重要。但是各个社区之间的节点属性存在差异，主要表现在社区密度及节点移动速度 2 方面。对于节点密度较高的社区来说，其节点中心度普遍高于稀疏状态的社区；对于节点移动速度较快的情况来说，其在给定时间内将与更多的节点相遇，使其活跃度高于网络中的其他节点。可见，权重因子需要能够根据当前社区状态动态调整，以有效地区分各个社区内节点的重要程度。本文所采用的调整方式如式(5)所示，节点密度较高的情况下，节点重要程度估计需要更多地考虑节点活跃度，即权重因子需要根据节点密度相应地增加；节点移动速度较快的情况下，节点重要程度估计需要更多地考虑节点中心度，即权重因子需要根据节点移动速度相应地减少。

$$\alpha = \frac{n(c_x)}{n} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n(c_x)} v_i}{\sum_{j=1}^n v_j} \right) \quad (5)$$

其中， $\frac{n(c_x)}{n}$ 表示社区 x 内的平均节点密度； v_i 表示节点的移动速度， $\frac{\sum_{i=1}^{n(c_x)} v_i}{\sum_{j=1}^n v_j}$ 为给定节点与其他节点平均移动速度的差异程度。

2.2 节点关系感知

如前所述，网络中的节点以自组织的形式组成多个社区，归属社区相同的节点联系紧密，关系强度较高，归属社区不同的节点关系较为稀疏。可见，准确地感知节点之间的关系能够使节点有效地利用垂直关系和水平关系实现数据转发。针对 ICWN 的特性，本文将归属社区相同的节点定义为邻居节点，即节点具有较为类似的运动规律，显然，在给定时间内，互为邻居的节点之间具有较高的连接次数和较长的连接持续时间。

与传统网络中邻居节点的定义与感知方法不同，此种网络架构下的链路具有间断特性，节点之间的连接状态具有极强的动态性。对于任意节点 i ，在下一时刻与其连接的节点可能并不相同；此外，随着节点在网络中不断运动，其将与多个节点相遇，单纯地以相遇状态判定邻居节点将导致邻居列表中包含归属社区不同的节点，影响节点关系评估的准确度。

为了能够更加准确地评估节点关系，本文设计了带有动态更新的邻居列表结构，其中，动态邻居列表中每个表项由 3 个元素组成：邻居节点 ID、最小相遇间隔时间以及最小延迟路径，具体结构如图 1 所示，其中， $Neighbor1, Neighbor2, Neighbor3, \dots, NeighborK$ 为邻居节点， $MT_{\min}(i,K)$ 是指节点 i 与邻居节点 K 的最小相遇间隔时间， $Path_{i \rightarrow K}$ 表示节点之间的最小延迟路径。

针对邻居列表中的 3 个表项，本文所提出的状态更新方法分别如下所述。

1) 邻居节点

根据 ICWN 中邻居节点的特性，对于任意节点

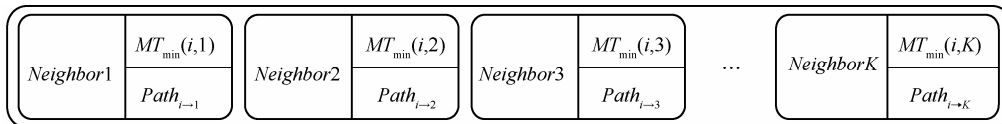


图1 节点所保存邻居列表结构

i ，其与邻居节点的关系较为紧密，在给定时间内，节点 i 与邻居节点的相遇次数及相遇持续时间高于其历史运动过程的均值。节点可根据本地保存的运动状态计算平均连接持续时间，如式(6)所示。

$$C_{ave} = \frac{\sum_{j=1}^{n(i)} \sum_{i=1}^{n(i,j)} Duration(i,j)}{n(i)} \quad (6)$$

其中， $n(i,j)$ 是节点 i,j 相遇的总次数， $Duration(i,j)$ 是 i,j 每次相遇的连接持续时间， $n(i)$ 是与节点 i 相遇节点的总数。

可见，对于节点 i 和 j 来说，若两者平均连接持续时间 C_{ij} 满足式(7)所示的约束条件，同时，所获知的相遇次数也满足相应的约束条件，则表明节点 j 为 i 的邻居节点。

$$C_{i,j} > C_{ave} \quad (7)$$

2) 最小相遇间隔时间

任意节点 i 记录到达各邻居节点 j 的平均相遇间隔 $T(i,j)$ ，即可获知节点 i 到达给定社区各个成员节点的相遇间隔时间矩阵 F_{C_x} 。

$$F_{C_x} = \begin{bmatrix} 0 & T(1,2) & \cdots & T(1,j) & \cdots & T(1,n_s) \\ T(2,1) & 0 & \cdots & T(2,j) & \cdots & T(2,n_s) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T(i,1) & T(i,2) & \cdots & T(i,j) & \cdots & T(i,n_s) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ T(n_s,1) & T(n_s,2) & \cdots & T(n_s,j) & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ICWN 中的节点在相遇之后需要交换相应的状态信息，为了更加准确、快速地实现相遇间隔时间矩阵中各个数据的更新，本文充分考虑间接相遇节点的状态对两者连接关系的影响。若同社区中节点 i 和节点 k 与节点 j 的相遇间隔时间满足式(9)所示约束条件，即节点 i,k 与节点 k,j 相遇间隔时间之和小于节点 i,j 相遇间隔时间，则上述矩阵中的相关表项需要按照式(10)的方式更新。

$$MT_{\min}(i,j) > MT_{\min}(i,k) + MT_{\min}(k,j) \quad (9)$$

$$MT_{\min}(i,j) = MT_{\min}(i,k) + MT_{\min}(k,j) \quad (10)$$

3) 最小延迟路径

最小延迟路径是指节点 i 到节点 j 间隔时间最短的路径，即 $MT_{\min}(i,j)$ 对应的路径。因此，上述最小相遇间隔时间数值出现更新的时候，也需要对其相应的最小相遇延迟路径 $Path_{i \rightarrow j}$ 进行更新。当中间

节点 k 能够缩减节点 i 和节点 j 之间的相遇间隔时间时，则合并 i,k 与 j,k 的最小相遇延迟路径。可见，此种情况下，2 条路径以一定的概率存在共有节点和链路，因此， $Path_{i \rightarrow j}$ 更新方式需要充分考虑这种特殊情况，具体如式(11)所示。

$$Path_{i \rightarrow j} = Path_{i \rightarrow k} \cup Path_{k \rightarrow j} \quad (11)$$

随着 $Path_{i \rightarrow j}$ 的持续更新，路径中可能包含多个中间节点 ID ，并且这些中间节点与节点 i 归属社区为同一个社区，若节点 i 归属社区为 c_x ，则更新后的 $Path_{i \rightarrow j}$ 中包含的节点 ID 数量最大值为 $n(c_x)$ 。

虽然，ICWN 中的节点资源有限，然而，对于具有较强社会属性的节点来说，随着网络运行不断更新，本文所建立的邻居列表始终不会大量占用节点缓存。其具体分析过程如下：如前所述，邻居列表中各个表项包括 3 个部分，分别为邻居节点 ID 、最小相遇延迟路径及最小相遇间隔时间。本文所提出的方法中节点 ID 项包括节点的社区编号与节点在社区内的编号，分别占 1 byte 空间；最小相遇间隔时间表项为 2 byte，其可记录的最大时间为 65 536 min；根据上述对于 $Path_{i \rightarrow j}$ 的分析，可知最小相遇延迟路径需要存储路径上各个节点的信息，其所占用空间的最大值为：节点 ID 所占空间 \times 节点 ID 数量，其大小低于 $2n(c_x)$ byte。此外，邻居列表中的表项个数不大于 $n(c_x)$ ，因此，可知邻居列表占用 $n(c_x)(2 + 2n(c_x) + 2)$ byte 空间。对于 100 个节点组成的社区来说，邻居列表占用的空间约为 20 kB。ICWN 中节点缓存空间远大于该值，故邻居列表的存储与维护不会造成节点缓存溢出；同时，节点相遇之后邻居列表交换过程所耗费的网络资源较少，对数据转发性能的影响较小。

3 社会属性感知的数据转发策略

根据节点的社会属性，与其相遇的节点可以分为 2 类，分别为归属社区相同的节点及归属社区不同的节点。显然，给定节点与这 2 类节点之间的社会关系呈现出较大的差异性，数据转发过程需要充分考虑节点之间的社会关系。

若数据携带节点归属社区为目标社区，则表明该节点将以较大的概率在其归属社区内部运动，并与大量同社区节点相遇，此种情况下，应充分考虑节点间水平社会关系，因此只需将数据在目标社区内部转发，以有效地降低社区间扩散所导致的网络

资源消耗。若数据携带节点归属社区并非目标社区,为了避免不必要的扩散,同时更快速、可靠地投递数据,则需要利用节点间的垂直社会关系,将数据副本转发至更容易进入目标社区的节点,使其继续以存储—携带—转发的方式传输该数据,尽可能地将数据扩散至目标社区,进而以社区内转发的方式完成数据投递。因此,本文所提出的数据转发策略包含社区间转发和社区内转发2个方面。

3.1 社区间数据转发机制

如前所述,社区间数据转发过程需要充分利用节点的垂直社会关系,在给定时间内,重要程度较高的节点能够以较大概率与网络中其他节点建立临时链路,因此,需要选择重要程度较高的节点作为下一跳中继节点继续携带该数据,以达到快速扩散数据副本,提高到达目标社区的目的。

节点 i 运动过程中记录到达各社区的次数,则该节点对其所携带数据重要程度 $w(i,m)$ 的估计方法如式(12)所示。

$$w(i,m) = \frac{\sum_{j=1}^{n(c_d)} n(i,j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{n(c_i)} W(i,k)} \quad (12)$$

其中, c_d 是数据 m 目的节点的归属社区, $\sum_{j=1}^{n(c_d)} n(i,j)$ 为节点 i 与 c_d 社区内所有节点历史相遇总次数。由上式可知,节点 i 进入目标社区越频繁, $w(i,m)$ 值就越大。可见,中继节点选择过程需尽可能将数据副本转发给 $w(i,m)$ 较大的节点,即选择对给定数据重要程度更高的节点作为中继节点,以较低的开销将数据转发至目标社区,并提高其成功投递概率。

当数据目的节点与节点 i 不属于同一个社区时,节点 i 将数据副本转发给重要程度高于自身的节点,进而以多副本的方式实现数据的可靠传输。可见,重要程度较高的节点能够以较高概率访问目标社区,因此,根据上述方式选择中继节点能够较大程度地降低控制开销,达到有效利用网络资源的目的。

3.2 社区内数据转发机制

根据社会网络理论可知,归属社区相同的节点以自组织的形式聚合成社区,社区内部的节点联系较为紧密,给定时间内节点相遇次数较多。与社区间数据转发过程不同,社区内数据转发过程需要以最小化传输延迟为主要目标。因此,可充分利用节

点间水平社会关系,合理地选择中继节点,以逐跳的方式将数据转发至目的节点。

如前所述,节点不断地根据运动过程中所获知的状态信息更新其邻居列表中各项值,同时,根据获取到的最小相遇间隔时间值更新节点相遇延迟矩阵 F_D ,进而,根据所获知的社区内部节点间最小延迟路径,达到感知节点之间的连接态势的目的。

对于网络中的节点来说,假设其所获知的连接关系如图2所示,其中,节点间边的权重为两节点间最小相遇延迟数值。根据上述节点关系感知方法,社区内部的节点之间存在较强的关系。为了能够实现高效的数据转发,本文以延迟为参数,根据节点维持的连接状态,计算节点之间的最优路径。数据携带节点根据与目的节点的最小相遇延迟路径,以逐跳的方式将数据副本转发至下一跳节点,直到数据被成功投递。

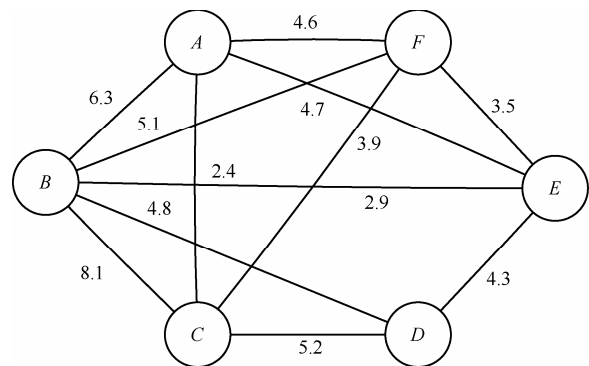


图2 社区内节点间最小相遇延迟路径

3.3 数据转发过程

综上所述,对于网络中任意两节点 i, j , SADFS 机制的数据转发具体执行过程如下。

step1 节点 i, j 相遇之后彼此交换概要向量,其中包括节点中心度、节点活跃度和动态邻居列表,并与本地信息对比,按1.2节、1.3节所述方式更新节点各自社会属性,并初始化变量 $M=1$, $Node_1 = i, Node_2 = j$ 。

step2 对于 $Node_1$,判断其数据列表中第 M 个数据, $Node_2$ 是否携带。若 $Node_2$ 已经携带,则比较列表中下一个数据。

step3 若 $Node_2$ 未携带该信息,比较数据 M 的目的节点 Des_M 是否与 $Node_2$ 处于同一社区。

1) 若为同一社区,则利用节点间的水平关系执行社区内转发操作。按照2.2节所述方式,计算 $Node_1$ 与 Des_M 的最小相遇延迟路径,若 $Node_2 \in Path_{Node_1 \rightarrow Des_M}$,

$Node_1$ 则向 $Node_2$ 转发数据 M 。

2) 若不为同一社区, 则利用节点间的垂直关系执行社区间转发操作。首先, $Node_1$ 按照式(5)估计自身对给定数据的重要程度, 若 $w(i, m)_M^{Node_2} > w(i, m)_M^{Node_1}$, $Node_1$ 则向 $Node_2$ 转发数据 M 。

step4 节点 N_s 的数据列表若未遍历结束, 则 $M = M + 1$, 并重复执行 step2, step3。

step5 若遍历已结束, 重置 $M=1$, $Node_1 = j$, $Node_2 = i$, 并重复 step2, step3, step4; 若数据列表遍历再次结束, 表明 i, j 中数据已处理完毕, i, j 间数据转发结束。

图 3 给出了节点 i 至节点 j 的数据转发过程。

```

when node i meet node j //节点 i 与节点 j 相遇
While(Connection is Up) //双方节点建立连接
{
    ExchangeSummary(Node i, Node j) //交换概要向量
    {
        if (DesM and j with same home-community) //若数据 M 的目的节点与节点 j 在同一社区
        {
            UpdateNeighborList(Node i, Node j); //更新双方节点邻居列表
            UpdateMT(i, j, DesM) //更新双方节点的最小相遇间隔时间
            Update Pathi-DesM //更新双方节点的最小延迟路径
            {
                if (j ∈ Pathi-DesM)
                {
                    ForwardPacket(i, j, M); //节点 i 将数据 M 转发至节点 j
                }else
                {
                    KeepPacket(i, M);
                }
            }
        }
        }else if(DesM and j with differernt home-community) 若数据 M 的目的节点与节点 j 不在同一社区
        {
            Update(w(i, M), w(j, M)); //更新数据 M 的重要程度
            if(w(i, M)M > w(i, M)M) //若节点 j 转发数据 M 的效用值更高
            {
                ForwardPacket(i, j, M); //节点 i 将数据 M 转发至节点 j
            }else
            {
                KeepPacket(i, M);
            }
        }
    }
}
    
```

图 3 数据转发过程的伪代码

4 数值结果

4.1 环境设置

本文采用机会网络(ONE, opportunistic network

environment)仿真平台^[14]验证所提出的数据转发策略(SADFS, social attributes aware data forwarding strategy)的有效性, 并与文献[8]所提出的基于区域访问概率估计的数据转发策略(prophet)及文献[10]所提出的带有节点间社会等级估计的数据转发策略(bubble-rap)进行比较。主要性能指标包括成功投递率、平均传输延迟以及负载率 3 个方面, 其中, 负载率定义为数据的冗余投递次数与成功投递消息数之间的比例, 如式(13)所示。

$$P_{\text{overhead}} = (M_t - M_s) / M_s \quad (13)$$

其中, P_{overhead} 为负载率, M_t 为数据副本总数, M_s 为目的节点成功接收数据副本数量。具体仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

参数设定	参数数值
网络区域	4 500 m × 3 400 m
网络仿真时间/h	12
节点通信方式	蓝牙
无线传输范围/m	10
传输速度/(kbit·s ⁻¹)	250
数据间隔时间/s	[25, 35]服从指数分布
社区数	4
节点的缓存/MB	5
节点移动速度/(m·s ⁻¹)	0.5~1.5
停留时间/s	0~10

4.2 节点密度对性能的影响

对 ICWN 来说, 节点密度与给定时间内连接建立次数直接相关, 进而直接影响数据传输过程的网络性能, 不同节点密度下的网络性能如图 4~图 6 所示。

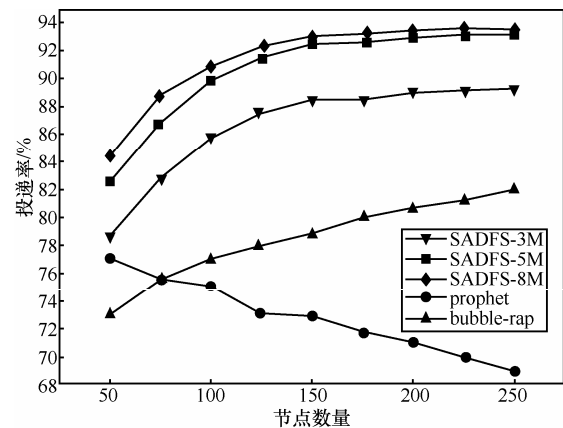


图 4 不同节点数对投递率的影响

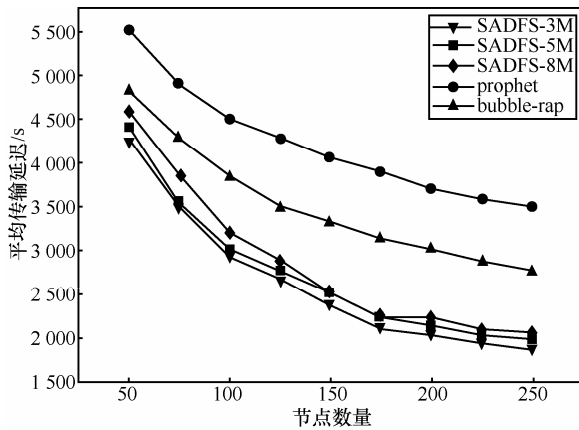


图5 不同节点数对平均传输延迟的影响

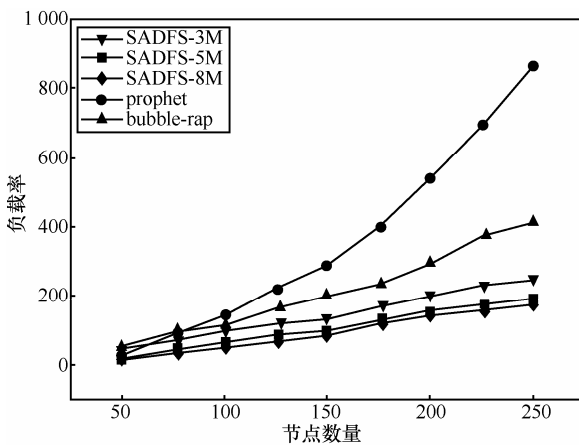


图6 不同节点数对负载率的影响

图4~图6针对SADFS自身参数改变(缓存大小)对网络性能的影响情况进行了比较。由结果可知,SADFS策略的性能随着缓存的增大而提升。其主要原因在于随着缓存的增大,节点能够携带的数据数量增多,提高了节点的数据承载能力,从而改善了网络性能。当缓存大小为5MB时,SADFS的性能趋于稳定,因此,文中后续部分选择缓存为5MB与其他策略进行对比。从图4可以看出,随着节点密度的增大,bubble-rap和SADFS策略的投递率逐渐上升,而prophet策略逐渐下降。相较于其他2种数据转发策略,SADFS策略的性能较好,数据成功投递率分别比prophet和bubble-rap平均高出24%、19%。其原因在于SADFS策略充分考虑了节点间的水平社会关系以及垂直社会关系,并且根据节点的重要程度选择合适的节点作为数据转发的中继节点,从而有效地提高了投递概率。图5描述了节点的密度与平均传输延迟的关系,随着节点密度增大,各种数据转发策略的平均传输延迟均有所下降,其原因在于随着节点的密度增大,节点相遇

的机会增加,彼此之间的相遇更加频繁,使数据扩散程度较高,因此数据能够在更短的时间内被转发到目的节点。其中,SADFS的平均传输延迟分别比prophet和bubble-rap平均低23%和11%。其原因在于SADFS有效地利用了节点间接相遇时间间隔,从而选择最短延迟路径转发数据,使数据能够在最短的时间内到达目的节点,从而有效地降低了延迟。图6中,各个策略负载率随着节点密度增加而增加,相较于prophet和bubble-rap策略,所提出策略的负载率分别提升了35%和16%。其原因在于随着节点数量的逐渐增加,数据被转发的次数也随之上升,产生的数据副本也相应地增加,所以负载率成上升趋势。由于SADFS综合考虑了节点的活跃度、中心度等社会属性,从而有效减少不必要的的数据转发,降低了负载。

由于节点数增多,节点相遇机会变多,数据成功投递的概率也随之上升。然而,随着节点密度的逐渐增加,网络负载也随之增大,导致网络产生拥塞,因此,prophet策略的数据成功投递率变小。而相对于所提出的SADFS策略,所设计的节点关系参数能够准确地反映当前网络状态,如邻居节点、节点中心度、活跃度等,且所提出的感知方法具有自适应特性,能够根据网络状态动态调整。此外,所提出的转发策略充分地考虑了节点之间的社会关系,有效地控制了副本数量,因此,SADFS策略的性能增益随节点密度的改变更加明显。

4.3 数据生存时间对性能的影响

当数据的生存时间(TTL, time to live)耗尽时,则节点将丢弃该数据,因此,生存时间直接决定了数据在网络中转发的时间,进而影响数据传输过程的网络性能,不同生存时间下的数值结果如图7~图9所示。

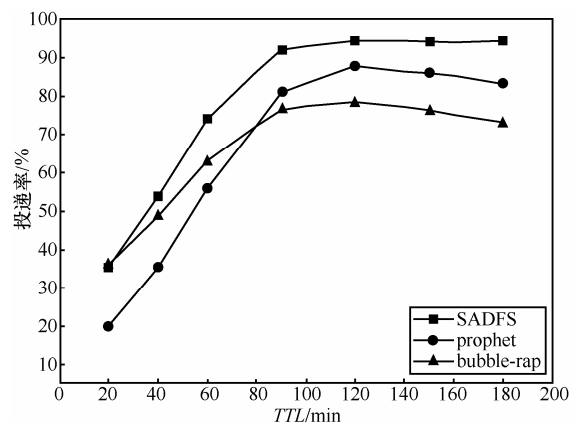


图7 数据TTL值对投递率的影响

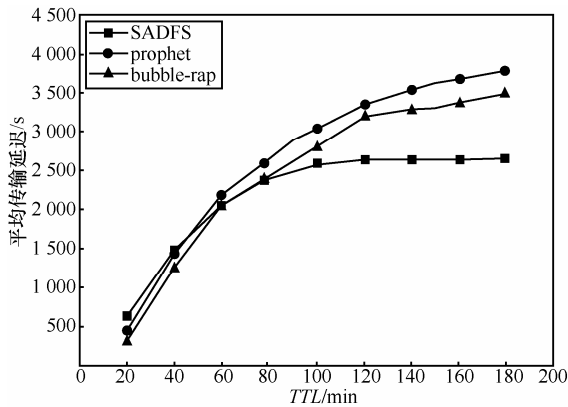


图 8 数据 TTL 值对平均传输延迟的影响

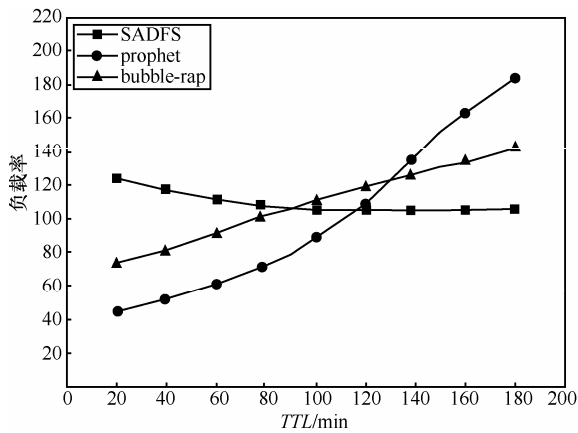


图 9 数据 TTL 值对负载率的影响

从图 7 所示结果可以看出，随着数据 TTL 值的增大，各种数据转发策略的成功投递率均总体呈现先上升然后下降的趋势。SADFS 的投递率分别比 prophet 和 bubble-rap 高 16% 和 18%。其原因在于 SADFS 通过感知节点间的社会关系，根据节点间最小相遇时间间隔制定数据转发策略，提高了数据在 TTL 终止之前被成功转发的可能性，有效地改善了投递率。图 8 描述了随着数据 TTL 值变化与平均传输延迟的关系，随着数据 TTL 增加，平均传输延迟也随之变高。SADFS 的网络延迟分别比 prophet 和 bubble-rap 低于 21% 和 19%。其原因在于随着 TTL 的增大，数据有可能在节点缓存停留较长时间，其平均传输延迟也随之增大。然而 SADFS 能够有效感知节点的连接态势，选择最小延迟路径进行数据转发，从而有效的降低了传输延迟。从图 9 可看出，相较于 prophet 和 bubble-rap 策略，SADFS 在数据 TTL 分别小于 120 min、90 min 时，负载分别高于上述 2 种策略，反之负载则低于上述 2 种策略。其原因在于与 SADFS 利用节点的重要程度，减少了数据不必要的转发，从而有效地控制了数据副本的增长，

降低了负载率随着 TTL 增加而上升的趋势。

显然，增加数据的 TTL 值将有效地提高其在节点缓存的停留时间，使其能够获得较多的转发机会，进而提升了数据的成功投递率。然而，当 TTL 值足够大时，若继续增加 TTL 值，则大量已经成功投递的数据副本将占用有限的节点缓存，使节点无法为其他数据提供中继及转发服务，导致其成功投递率下降。通过采用节点关系感知的数据转发策略，中继节点选择与目标社区关系更为紧密的节点继续承载数据，其数据转发决策更加合理，数据传输速度更快，使其延迟性能得到了显著改善。根据上述负载率的定义可知，按照此种方式转发数据，给定数据的扩散程度较小，数据的副本数量得到有效控制，使网络负载率较低。

4.4 数据大小对性能的影响

在 ICWN 网络中，由于数据大小不仅影响节点缓存中存储数据的个数，同时也决定节点在单次连接时间中所能转发的数据数量。不同数据大小下的数值结果如图 10~图 12 所示。

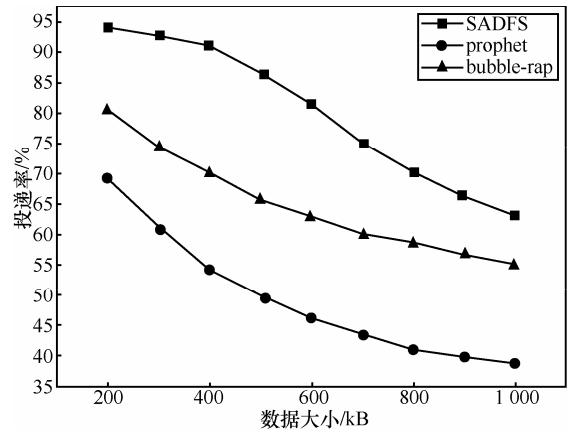


图 10 不同数据大小对投递率的影响

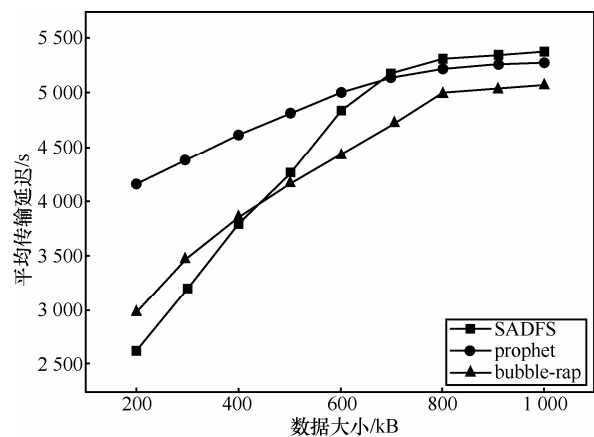


图 11 不同数据大小对平均传输延迟的影响

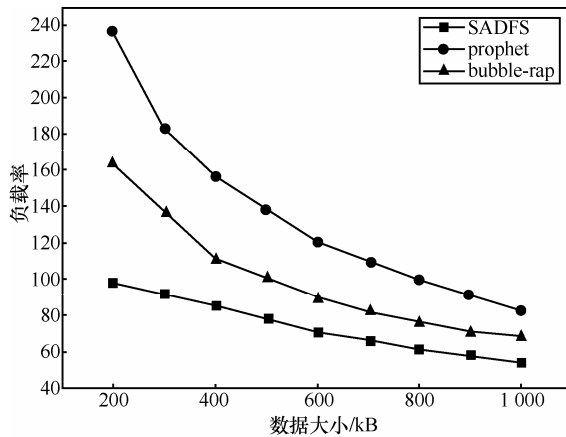


图12 不同数据大小对负载率的影响

从图10所示结果可知,随着数据长度不断增加,数据的投递率整体呈下降趋势。其主要原因在于随着数据长度的增大,节点所能携带的分组数量减少,则对于连接时间有限的间断连接无线网络来说,数据被丢弃的可能性增大,从而导致数据被成功转发的概率降低。其中,SADFS的投递率方面平均比prophet高25%,比bubble-rap高19%。其原因在于SADFS利用中心程度、活跃度估计节点的重要度,从而更加合理地选择中继节点,有效地提高了缓存的利用率,降低了投递率随着数据增大而降低的趋势。从图11所示结果可知,随着数据长度的增加,传输延迟总体呈增大趋势,其原因在于在缓存一定的情况下,数据长度越大,节点所能携带的数据越少,则数据被转发的机会减少,因此数据被成功转发到目的节点的时间增大。SADFS策略平均传输延迟比prophet高10%,比bubble-rap高6%。其原因在于SADFS策略选择节点重要程度高的节点作为中继节点,因此数据副本在节点处缓存时间略长,增加了一定的传输延迟。从图12所示结果可以看出,随着数据长度不断增加,3种策略的负载率整体呈下降趋势,其原因在于随着数据长度的增加,节点携带的数据量减少,转发过程中产生的数据副本数量减少,从而导致负载率下降。其中,SADFS的负载率比prophet低13%,比bubble-rap低7%。其原因在于数据变大会导致节点可携带的数据数变少,进而节点间通信过程中可传递的数据数量下降,而SADFS根据节点对数据的重要程度,选择合理的节点作为中继节点,有效地减少了中继转发次数,保证数据到达目的节点的可靠性,从而降低了负载率。

5 结束语

本文提出一种带有节点社会属性感知的数据转发策略,在ICWN网络中以较小的网络资源消耗完成高效的数据转发。网络中各个节点以分布式的方式感知节点之间的关系,并充分利用节点之间的水平社会关系及垂直社会关系,辅以动态邻居节点感知、最小延迟路径及相遇间隔时间等网络状态感知方法,为不同数据合理地选择中继节点,进而完成数据转发。结果表明,所提出的SADFS能够有效地控制数据转发开销并改善网络资源利用率。

参考文献:

- [1] QIN S, FENG G, ZHANG Y D. How the contact-probing mechanism affects the transmission capacity of delay-tolerant networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1825-1834.
- [2] KHABBAZ M J, ASSI C M, FAWAZ W F. Disruption-tolerant networking: A comprehensive survey on recent developments and persisting challenges[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2012, 14(2): 607-640.
- [3] FALL K, FARRELL S. DTN: an architectural retrospective[J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 2008, 26(5): 828-836.
- [4] BUM S J, TIMOTH M, YOONSUCK C. Effects of varying the delay distribution in random, scale-free, and small-world networks[A]. Future Information Technology and Management Engineering[C]. USA, 2008. 57-60.
- [5] BULUT E, WANG Z J, SZYMANSKI B K. Cost-effective multiperiod spraying for routing in delay-tolerant networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(5): 1530-1543.
- [6] NELSON S C, BAKHT M K. Encounter-based routing in DTNs[A]. Proc Of IEEE INFOCOM[C]. Rio de Janeiro, Brazil, 2009, 846-854.
- [7] CONAN V, COMMUN T, CLARKSBURG, M D, *et al.* Fixed point opportunistic routing in delay tolerant networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5):773-782.
- [8] SAMO G, ELWYN D, ANDERS L. The evolution of a DTN routing protocol[A]. ACM MobiCom Workshop on Challenged Networks[C]. Las Vegas, Nevada, USA, 2011, 27-30.
- [9] ZHOU R T. Group based epidemic routing for delay and tolerant networks[A]. Proc of IEEE WiCOM[C]. Chengdu, China, 2010, 1-4.
- [10] HUI P, CROWCROFT J, YONEKI E. Bubble rap: social-based forwarding in delay tolerant networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 10(11): 1536-1550.
- [11] DALY E, HAAHR M. Social network analysis for information flow in

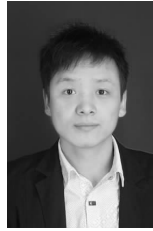
disconnected delay-tolerant MANETs[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(5): 606-621.

[12] GAO W, LI Q H, ZHAO B, *et al.* Social-aware multicast in disruption-tolerant networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(5): 1553-1566.

[13] 吴大鹏, 张普宁, 王汝言. 节点连接态势感知的低开销机会网络消息传输策略[J]. 通信学报, 2013, 34(3): 44-52.

WU D P, ZHANG P N, WANG R Y. Connection status aware cost efficient message transmission mechanism in opportunistic networks[J]. Journal of Communications, 2013, 34(3): 44-52.

[14] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[A]. Proceedings of 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques[C]. Rome, Italy, 2009. 1-10.



张洪沛 (1988-), 男, 河南南阳人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为社会化泛在无线网络。



刘乔寿 (1979-), 男, 云南曲靖人, 硕士, 重庆邮电大学讲师, 主要研究方向为泛在无线网络、物联网等。

作者简介:



吴大鹏 (1979-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为泛在无线网络、无线网络服务质量管理等。



熊余 (1982-), 男, 四川资众人, 重庆邮电大学博士生、副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为宽带网络服务质量控制及抗毁技术。



孔晓龙 (1988-), 男, 安徽六安人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为间断连接无线网络。



王汝言 (1969-), 男, 湖北浠水人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为泛在网络、多媒体信息处理等。